Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM
ISSN 0188-4611, núm. 87, 2015, pp. 76-87, dx.doi.org/10.14350/rig.41858

Caracterización del peligro por inundaciones en el oasis La Purísima, Baja California Sur, México

Recibido: 6 de septiembre de 2013. Aceptado en versión final: 31 de marzo de 2014.

Jobst Wurl*
Cynthia Nayeli Martínez García*
Miguel Ángel Imaz Lamadrid*

Resumen. En el estado de Baja California Sur existen solo cuatro oasis con extensiones mayores a 2.0 km^2; La Purísima (2.25 km^2) representa el tercero en extensión. En el pasado el oasis fue frecuentemente afectado por inundaciones resultantes de los eventos extremos de precipitación, que generaron graves daños en la cuenca.

Se realizó un diagnóstico del oasis La Purísima, con respecto a posibles inundaciones como consecuencia de lluvias extremas, lo cual incluye el análisis estadístico de la precipitación para la elaboración de un modelo hidrológico e hidráulico, con el fin de calcular el caudal máximo, el volumen y la frecuencia de crecidas en los cursos del arroyo Cadegomo bajo diferentes escenarios de lluvias extremas. Finalmente se elaboró un mapa de peligro por inundación según los escenarios elaborados.

Se efectuó un análisis de la ocurrencia de inundaciones en el pasado y sus efectos en el oasis por medio de evidencias históricas de inundación de la zona, para verificar su posible aplicación en la calibración de los modelos.

Los caudales resultantes de los eventos de precipitación extremos generan un incremento importante de los niveles en el drenaje de la cuenca. La respuesta del arroyo es un incremento en el área de inundación de hasta 14% respecto al tiempo de retorno de 20 años. Un evento de 1 000 años generaría un incremento en el área de inundación de 67% y bajas, afectando las zonas de la región urbana, así como todos los lotes de cultivo.

Palabras clave: Inundaciones, análisis de precipitaciones extremas, modelación hidráulica, variabilidad climática.

Flood hazard assessment of La Purísima oasis in Baja Califonia Sur, Mexico

Abstract. In the Mexican state of Baja California Sur there are only four oasis of more than 2.0 km^2; La Purísima (2.25 km^2) is the third largest of them. In the past this oasis was frequently affected by flooding, resulting from extreme rainfall events, which in several occasions generated severe destruction in the oasis. The first permanent settlement in the oasis of La Purísima was the foundation of a Jesuit mission at Cadegomó River in 1720. Since then the oasis repeatedly has been affected by floods; for example hurricanes caused severe damages in 1770 and in 1828, when

* Universidad Autónoma de Baja California Sur, Carretera al Sur Km 5.5, 23080 La Paz, Baja California Sur, México. E-mail: jwurl@uabcs.mx; geo.cynthia.mtz@gmail.com; geomaimaz@gmail.com

Cómo citar:

Wurl, J., C. N. Martínez G. y M. Á. Imaz L. (2015), "Caracterización del peligro por inundaciones en el oasis La Purísima, Baja California Sur, México", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 87, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 76-87, dx.doi.org/10.14350/rig.41858.

finally the mission was abandoned. It took ten years to revive the mission, which remained in operation for several years after independence of Mexico. After its secularization, La Purísima became village in 1858. Major inundations occurred in 1957 and 1959, as well as in 2008 and 2009 which affected all farmers in the oasis. Parts of garden areas were lost, many fields covered with sand and the irrigation channels were severely damaged. The destruction included plantations of avocado, mango, guava, banana, plum, apple, black fig, orange trees, sugar cane and severe livestock losses.

The mayor part of the La Purísima watershed, with a total area of 1,728.6 km^2 is dominated by a very arid, warm climate (BWh (x') after Köppen), with an average annual temperature between 18° and 20° C, whereas the lowlands, near the Pacific Ocean are influenced by a very dry and warm weather (BW (h›) (x›)), with a higher annual average temperature of 22° C.

The main extreme weather events that affect the area are the tropical cyclones that originate in the Northeast Pacific, and affect the peninsula of Baja California during the months May to November. In the last decade there has been an increase of extreme rain events in the area, caused by tropical cyclones.

A hydrological analysis was conducted, regarding to possible flooding levels, caused by extreme rainfall events. This included a statistical analysis of precipitation data in order to define the relation between rainfall intensity and return period. The data were entered into hydrologic and hydraulic models, using HEC-1 and HEC-RAS software in combination, which permitted to calculate the volume and impact of floods in the Cadegomo River under different scenarios of extreme rainfall events. According to the evaluated scenarios of extreme runoff events, a hazard map of flooding areas under different return periods was elaborated.

The results indicate a significant rise in the water levels of the drainage basin, caused from extreme rainfall events with an increase in the flooded area by 14%, estimated for the return period of 20 years and a 1 000 year event would generate an increase in the flooded area by 67%, which would affect important areas of the urban region, as well as nearly all gardens of the oasis.

The occurrence of floods in the past and their effects on the oasis La Purísima were analyzed through historical evidences which permitted to verify the scenarios and calibrate the models. In three occasions runoff volumes of higher magnitude were documented at the hydrological station "Ojo de Agua", run by the National Water Commission (CONAGUA): in September 1962, December 1972 and September 1974. The rainfall recorded in 1972 was 69 mm, which caused a total runoff of 29.48 million cubic meters, observed during the next 230 hours; this is comparable to a model event with a return period of 10 years.

In Baja California Sur, due to the lack of direct runoff measurements, it is of utmost importance to continue elaborating climate and hydraulic models to quantify the local effects that could be expected before the end phenomenon of runoff, in order to install measures to limit the economic damage and impacts on society.

Key words: Floods, hydraulic modeling, analysis of rainfall extremes, climate variation on climate.

INTRODUCCIÓN

Los oasis en la Península de Baja California se enfrentan a partir de la segunda mitad del siglo XX al despoblamiento, al deterioro ambiental y a la pérdida de su cultura (Cariño y Ortega, 2014); en el caso del oasis La Purísima se observó un 43% de disminución de la población (según los censos del INEGI en 2010). El oasis está afectado por un aislamiento debido a su distancia hacia los centros urbanos y perdió gran parte de su producción agrícola. Una de las razones fue la falta de agua como consecuencia de la poca inversión en infraestructura y debido a los daños por inundaciones (Routson, 2012).

En los últimos años se efectuaron diferentes actividades de protección y desarrollo del oasis, con la intención de mejorar sus condiciones, revivir las actividades económicas y conservar sus tradiciones. Desde 2008 el oasis de La Purísima forma parte del humedal Los Comondú, incluido en la lista Ramsar de humedales de importancia internacional (RAMSAR, 2014) y el gobierno de Baja California Sur está desarrollando varios proyectos para impulsar la actividad económica y el turismo alternativo, de los cuales destacan dos: en 2011 se implementó el Programa de Empleo Temporal (PET) y en 2013 se incluyó a La Purísima en el Proyecto Estratégico de Desarrollo Sustentable Oasis Sudcalifornianos (Secretaría de Promoción y Desarrollo Económico, 2014). Pero el desarrollo esperado en zonas cercanas al río Cadegomo puede ser afectado por inundaciones con daños graves; en los últimos diez años se han observado las lluvias más intensas desde que la observación inició en 1938.

Se realizó un diagnóstico del oasis La Purísima, con respecto a posibles inundaciones como consecuencia de lluvias extremas, lo cual incluye el análisis estadístico de la precipitación para la elaboración de un modelo hidrológico e hidráulico, con el fin de calcular el caudal máximo, el volumen y la frecuencia de crecidas en los cursos

del arroyo Cadegomo bajo diferentes escenarios de lluvias extremas. Finalmente se elaboró del mapa de peligro por inundación según los escenarios elaborados.

Arroyo La Purísima y río Cadegomo

El arroyo La Purísima tiene su origen en los escurrimientos procedentes del cerro de La Tentación en el parteaguas occidental de la Sierra La Giganta. Las corrientes formadas descienden desde una altitud del orden de los 1 000 msnm con dirección hacia el sur para formar el arroyo La Purísima. Cerca de la ranchería Ojo de Agua, al recibir las aportaciones de una serie de manantiales, su régimen se torna perenne (unos 32 km aguas abajo de sus orígenes). La dirección cambia hacia el oeste y más adelante al sur hacia el sitio Huerta Vieja. Fluyendo con dirección suroeste, pasando las localidades de Carambuche, San Isidro y La Purísima, el arroyo se une con diversas aportaciones de corrientes secundarias y recibe el nombre río Cadegomo (Figura 1). A 3 km antes de su desembocadura al Océano Pacífico, recibe por la margen derecha al arroyo San Gregorio y finalmente desemboca en el estero de San Gregorio en el Océano Pacífico (Ruiz *et al.*, 2008).

El oasis La Purísima

En el estado de Baja California Sur existen solo cuatro oasis con extensiones mayores a 2.0 km^2; La Purísima (2.25 km^2) representa el tercero en extensión, superado por San Ignacio y Boca de la Sierra (Maya *et al.*, 1997). El poblado de La Purísima se ubica al lado del río Cadegomo, unos 25 km río arriba de la desembocadura en la costa del Pacífico. Este arroyo conforma el afluente principal de la cuenca La Purísima. A excepción de la mayoría de los arroyos en Baja California Sur, el arroyo Cadegomo mantiene en grandes partes un flujo de agua durante todo el año. CONAGUA (2013) registró el flujo en el arroyo en la estación Ojo de Agua con un máximo de 96.4 m^3/s y un flujo mínimo de 0.023 m^3/s y calculó un volumen medio anual de escurrimiento natural de 36.86 millones de m^3. El río Cadegomo drena la zona alta de la Sierra La Giganta; la cuenca tiene una superficie de 1 728.6 km^2. El acceso más fácil a la población La Purísima es por la carretera Transpeninsular desde Ciudad Insurgentes con una longitud de 160 km. Las dos poblaciones –Carambuché y San Isidro– se ubican aguas arriba de La Purísima.

En 1930 la presa Carambuché fue construida en el arroyo, aguas arriba de los tres pueblos. Esta presa distribuye la mayor parte del agua dulce para

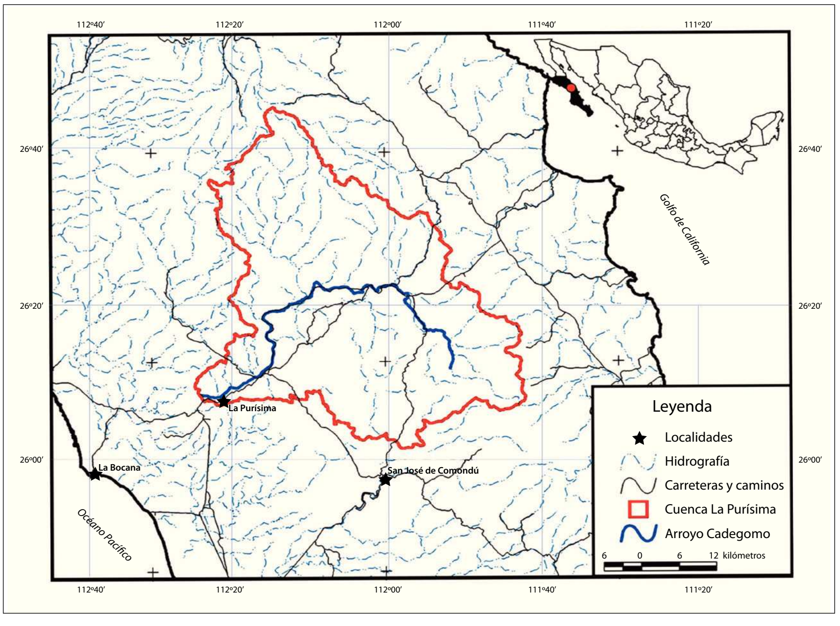


Figura 1. Localización del área en estudio.

las poblaciones Carambuché y San Isidro; el agua restante llega a la población La Purísima.

Marco geológico

La Sierra de la Giganta está constituida principalmente por rocas extrusivas y epiclásticas de edad miocénica pertenecientes a la Formación Comondú (Heim, 1922). Presenta rocas volcánicas composición andesítica y tobas riolíticas (Hausback, 1984) con algunas alternancias de estratos epiclásticos (Aranda y Pérez, 1988). Según SGM (2010), hacia el norte se manifiesta una serie de aparatos volcánicos que originaron derrames de composición basáltica fechados por Sawlan y Smith (1984) en 3.59 +/- 0.12 ma que cubren discordantemente a la Formación Comondú. Hacia el oeste, las rocas de esta formación tienden a estar cubiertas por secuencias de sedimentos poco consolidados a consolidados, de edades que van del Pleistoceno al Holoceno. En el área en estudio se encuentra la siguiente estratigrafía a partir del Terciario medio: rocas volcano-sedimentarias del Terciario medio comprenden la Sierra de la Giganta; y las fronteras de la cuenca; y parte de su relleno, localizadas hacia su parte oriental y norte, y depositadas de manera discordante sobre rocas graníticas cretácicas y sedimentarias del Terciario temprano. Estas rocas comprenden una secuencia de brechas y areniscas volcánicas, tobas, areniscas tobáceas y flujos de basaltos, con un espesor total de 1 200 m.

La Formación Comondú tiene una inclinación general de 10 a 12º hacia el oeste y decrece de espesor en este mismo sentido, de manera que en la costa del Golfo de California se tienen los mayores espesores, y menores hacia la del Océano Pacífico. El contacto con las rocas sedimentarias de la cuenca Purísima-Hiray es transicional y muy irregular, y las rocas más recientes de la cuenca cubren transicionalmente a las rocas volcano-sedimentarias de la Formación Comondú. En la región oriental de la cuenca es común la presencia de mesetas de basalto, marcando el inicio de la cuenca. Rocas sedimentarias del Plioceno-Cuaternario, agrupadas en varias formaciones, fueron depositadas de manera concordante y discordante encima de las rocas del Terciario. Los sedimentos no consolidados corresponden a depósitos aluviales y eólicos (INEGI, 1996).

El clima

En el pueblo La Purísima se ubica la estación climática del Servicio Meteorológico Nacional (SMN; No. 3029) a una altura de 95 msnm. Los registros del clima empezaron en esta estación en 1938 y han permitido contar con información de variables relevantes para comprender los procesos ambientales en la zona. Según la clasificación climática, desarrollada por Köppen, en el área se encuentran dos tipos de clima principalmente. En la gran parte de la cuenca predomina un clima muy árido y semicálido (BWh(x')), con una temperatura media anual entre 18 y 20° C. La temperatura del mes más frío es menor a los 18° C, mientras que en las zonas bajas, cerca de la desembocadura, predomina un clima muy árido y cálido (BW(h')(x')), con una temperatura media anual mayor de 22º C; la temperatura en el mes más frío es mayor a 18º C (García y CONABIO, 1998).

La pérdida de humedad por evaporación directa en La Purísima es de 1 510 mm en promedio. Las lluvias en el estado de Baja California Sur ocurren principalmente en verano, debido al efecto de ciclones tropicales, y en menor grado en invierno. De acuerdo con la CNA (2002), la relación entre las lluvias veraniegas e invernales es de 70 y 30%, respectivamente. En la estación La Purísima se registran en promedio 127.3 mm de precipitación al año (solo 12.7 días al año con lluvia y 20.7 con neblinas). El mes con mayor precipitación es agosto, con 26.9 mm en promedio y la menor precipitación corresponde a junio con solo 0.1 mm (SMN, 2013). En la Figura 2 se presenta la distribución anual del promedio de precipitación, que refleja la centralidad de la época de ciclones para la zona, y la prácticamente absoluta ausencia de lluvia de marzo a junio.

Huracanes

Los principales eventos climáticos extremos que llegan a afectar la zona son las perturbaciones ciclónicas de origen tropical que se originan en el Pacífico Nororiental. Debido a las aguas frías de la Corriente de California que bañan la costa occidental de la Península, generalmente la trayectoria de tales perturbaciones sufre desviación hacia el oeste y solo en raras ocasiones llegan a cruzar la península. Aunque

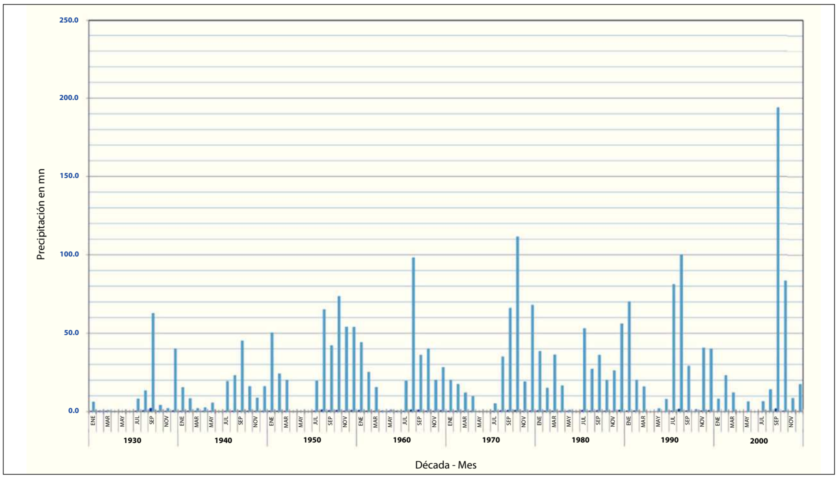


Figura 2. Promedio diario y máximo de precipitación en 24 horas por década-mes para la estaciones "La Purísima", tomada de SMN (2012a).

se han llegado a presentar huracanes intensos de categoría 4 o en pocas ocasiones de 5 en el Pacífico nororiental, en su trayectoria al norte-noroeste, van disminuyendo su fuerza en la medida en que se encuentran con las aguas frías de la Corriente de California y rara vez impactan en la península huracanes con una categoría mayor a 2; sin embargo, pueden ocasionar daños importantes (económicos por inundación y pérdida de cosechas o ganado).

METODOLOGÍA

Análisis estadístico de la precipitación extrema

La forma más común de representar el carácter probabilístico de los ciclones tropicales es en términos de un periodo de retorno (recurrencia), lo cual es el lapso que en promedio transcurre entre la ocurrencia de fenómenos de cierta intensidad. Para el análisis climático se realizó un análisis estadístico de la estación La Purísima, para definir las lluvias máximas esperadas en diferentes tiempos de retorno, lo cual es un requisito para determinar el caudal estimado para una determinada recurrencia.

En hidrología se usa el concepto de periodo de retorno que varía típicamente entre 10 a 5 000 años. La selección de periodo de retorno depende de varios factores, entre los cuales se incluyen la morfología y el tamaño de la cuenca, la importancia de la estructura y el grado de seguridad deseado. Además, se define la Precipitación Máxima Probable (PMP) como la mayor cantidad de precipitación meteorológicamente posible para una determinada duración, en un área afectada por un temporal y en una época del año determinada. En los Estados Unidos se han elaborado mapas de la PMP desde principios de la década de 1960. Desafortunadamente en México existen mapas de la PMP solo para algunas áreas (por ejemplo, San Luis Potosí) y en el resto del territorio mexicano es práctica común usar el valor máximo de periodo de retorno de 10 000 años (calculado para una estación climatológica cercana) a ser usado en el diseño hidrológico (por ejemplo, aliviaderos de emergencia e hidrogramas de borde libre y en el diseño de presas). Para fines de este estudio, debido al tamaño de la cuenca, se utilizó como máximo tiempo de retorno 1 000 años.

El análisis estadístico se obtuvo mediante el software AX (Ajuste de Función de Probabilidad, versión 1-05) elaborado por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) y la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM; Jiménez, 1997). Este programa ajusta distintas funciones de probabilidad (distribución Normal, Log Normal, Gumbel, Exponencial, Gamma y Gumbel Doble) a muestras de datos y calcula el error estándar de cada una de ellas respecto a las de la muestra y fue utilizado en varios estudios en México (Suárez, 2013; Ramírez *et al.*, 2007; Jiménez, 2011). Debido a las condiciones climáticas de la región,

se definió el método Doble Gumbel como el más adecuado para su aplicación al modelo. A partir de los registros diarios de precipitación máxima de 1948 a 2010 (SMN, 2012b) se obtuvieron las intensidades de precipitación, asociadas a distintos periodos de retorno y duraciones de precipitación máxima diaria. Con las características fisiográficas obtenidas del modelo digital de elevaciones y las isoyetas para distintas duraciones de precipitación en minutos (SCT, 2000), se estimó con el método racional el gasto pico que se puede presentar en la zona en estudio para distintos tiempos de retorno.

Modelación hidrológica e hidráulica

Se utilizó como fuente para la topografía los datos AsterGDEM con el fin de definir zonas de inundación bajo escenarios de lluvias extremas. El sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), es un sistema de observación especial que posee la capacidad de capturar imágenes estereoscópicas de una misma porción de terreno, por lo que permite la extracción de modelos de elevación digital (DEM). El Modelo Digital de Elevación (MDE) generado con base en el AsterGDEM tiene una resolución nominal de 30 m en planimetría y da resultados satisfactorios para la modelación hidrodinámica.

Para la delimitación de la cuenca hidrográfica, la definición de la red de drenaje y los parámetros morfométricos de la cuenca, se utilizó el algoritmo TOPAZ, que es una herramienta de análisis que provee procesamiento y evaluación de DEM en formato raster para identificar rasgos topográficos (Martz, 2002). Por medio del DEM se generó también la planta topográfica refinada para el área del arroyo, sobre la cual se definieron secciones perpendiculares a la línea de flujo del arroyo.

Con base en los escenarios de lluvias extremas según diferentes tiempos de retorno, se calcularon con el modelo HEC-1 los escurrimientos en respuesta a la precipitación sobre la cuenca hidrológica, la cual el modelo representa interconectada a un sistema hidrológico con diferentes componentes hidráulicos. Cada componente modela un aspecto de los procesos de precipitación-escurrimiento dentro de una porción de la cuenca. Un componente puede representar un escurrimiento, una corriente de canal o un reservorio. La representación de los componentes requiere un conjunto de parámetros los cuales especifiquen las características particulares de cada componente y las relaciones matemáticas que describen el proceso físico. El resultado del proceso de modelación es el cálculo de hidrogramas hipotéticos de escurrimiento para una localidad específica.

Para calcular el tiempo de retraso se utilizó el método Tulsa Rural, el cual se expresa con la siguiente fórmula:

$$\text{Tiempo de retraso}=Ct^*(L^*Lca/\text{sqrt}(S))^m$$

donde:
Ct es un coeficiente.
L es la longitud de la cuenca.
Lca es la longitud al centroide.
m es el coeficiente de poder.
S es la pendiente de la distancia de flujo máximo.

Para el modelo hidráulico se utilizó el programa HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Centers River Analysis System*) implementado en la extensión Geo-RAS para ArcView 3.2.

HEC-RAS es un software integrado que permite realizar simulaciones hidráulicas unidimensionales para flujos de corrientes permanente y variable (USACE, 2010). El sistema está conformado por una interface gráfica, componentes de análisis hidráulicos, almacenamiento de información y una interface para la generación de gráficas y reportes. Mediante este software se puede modelar el comportamiento de un escurrimiento en respuesta a la topografía, puentes, bordos y presas. El modelo HEC-RAS usa como base la fórmula de Manning para calcular el área hidráulica:

$$Q = \frac{1}{n} Rh^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} A$$

donde:
Q = gasto real máximo, m^3/s
S = pendiente
Rh = Radio Hidráulico = A/p
A = area, m^2
n = coeficiente de Manning =0.033

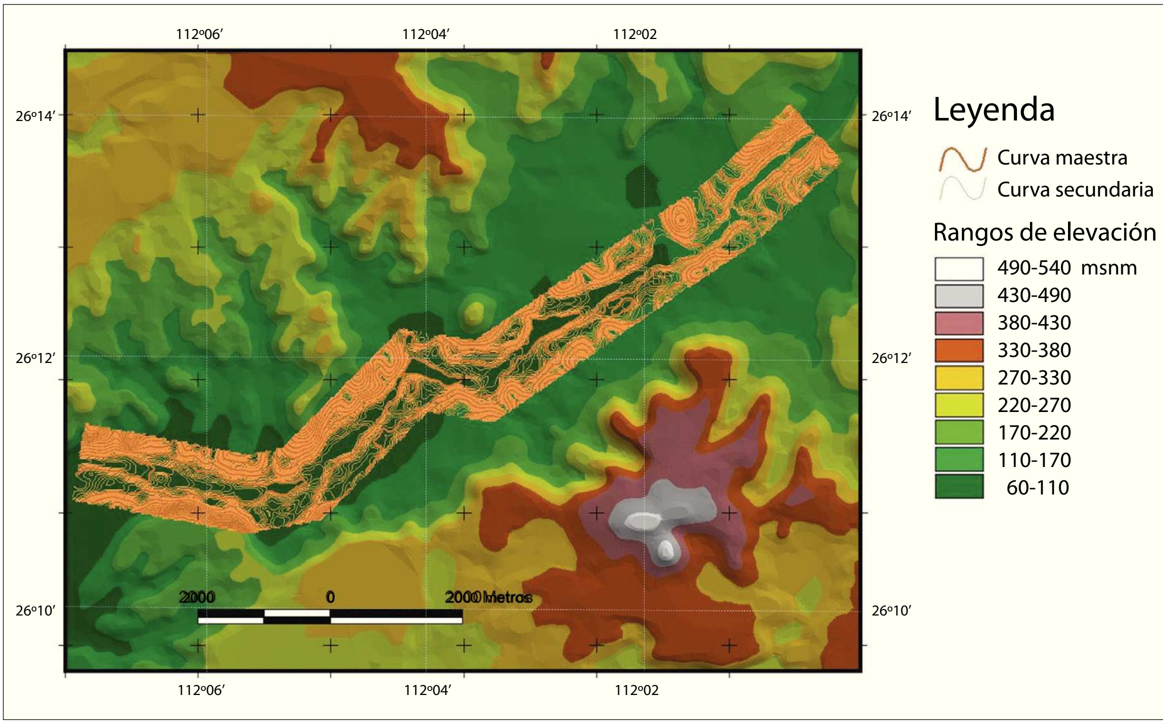


Figura 3. Topografía base del oasis La Purísima.

P = perímetro mojado, m²

Para la preparación geométrica del modelo se empleó la extensión GEO-RAS, creando primeramente una Red Triangular (TIN) utilizando curvas de nivel a 1 m de equidistancia obtenidas del DEM previamente definido. Se definieron secciones cada 50 m para el sitio de La Purísima, bordos y límites del arroyo. Una vez construidas las geometrías se ingresaron los escurrimientos generados por el modelo HEC-1 y se corrió el modelo en modalidad supercrítica.

Análisis de la ocurrencia de inundaciones en el pasado

Se realizó un análisis de la ocurrencia de inundaciones en el pasado y sus efectos en el oasis por medio de evidencias históricas de inundación de la zona, para verificar su posible aplicación en la calibración de los modelos. Además se analizaron los gastos instantáneos, registrados en la estación hidrométrica Ojo de Agua y documentados en el "Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS)".

RESULTADOS

Análisis de la ocurrencia de inundaciones en el pasado y sus efectos en el oasis

Los primeros asentamientos humanos permanentes en la cuenca La Purísima resultaron de la fundación de una misión jesuita (La Purísima Concepción de María Cadegomo) en la cañada del rio Cadegomo en 1720. Poco después se construyó una presa sobre el arroyo y canales para el riego de cultivos como algodón, frijol, trigo, garbanzo, maíz, granadas, vides, higos y olivos (Arredondo, 2012). Desde la fundación de la misión existe evidencia de que el oasis ha sido afectado por inundaciones, ya que en varias ocasiones, escurrimientos extremos causaron la destrucción de la presa y de los canales. En la misión se documentó la ocurrencia de inundaciones, cuando las obras o el edificio de la misión



Figura 4. Comparación del palmar entre los poblados La Purísima y San Isidro antes y durante inundaciones causadas por el huracán "Jimena" en septiembre del 2009.

fueron afectados (por ejemplo, el Padre Palóu documentó en 1771 que el edificio de la Misión, construido de adobe, fue severamente dañado por un huracán en 1770 (Routson, 2012)). En 1828 la misión fue abandonada debido a los daños por inundaciones causadas por un huracán que provocó la destrucción de la presa y de las acequias (Trejo, 2002). Según Urbano (1859) la misión tardó en revivir hasta 1838 con la construcción de un nuevo edificio en La Purísima. La misión se mantuvo funcionando durante varios años después de la independencia. Después de la secularización de la misión, se decretó en 1858 que La Purísima fuera elevado a la categoría de pueblo (Valadés, 1974). La población San Isidro se fundó entre 1930 y 1935 y se construyó la presa Carambuché en el arroyo, aguas arriba de los tres pueblos, donde se capta el agua de un manantial. Desde 1934 se distribuye la mayor parte del agua para las poblaciones Carambuché y San Isidro; el agua restante llega a la población La Purísima (Routson, 2012).

En 1957, debido a las inundaciones, los restos del edificio de la primera misión de La Purísima estaban casi desaparecidos, solo unos pocos metros de una pared de adobe quedaban visibles (Arredondo, 2012). En 1959 hubo otra inundación importante, la cual causó la muerte de dos familias (Routson, 2012).

En 2008 hubo inundaciones importantes provocadas por el huracán "John" y las últimas inundaciones en 2009 fueron provocadas por "Jimena"; en esta ocasión, todos los agricultores del oasis fueron afectados, algunos perdieron gran parte de sus huertas y muchos campos quedaron cubiertos de arena. El agua alcanzó dos metros de profundidad en los campos, derribó árboles y cercas de piedra, y afectó gravemente los canales de riego (*Ibid.*). Los canales que abastecen de agua a las comunidades fueron azolvados en 95% de lodo, piedras, grava y algunos bloques y rocas mayores, y entre 1 500 y 2 000 de palmas datileras fueron afectadas. Además se reportó la pérdida de tierras de cultivo, destrucción de plantaciones de aguacate, mango, guayaba, plátano, ciruelo, manzana, higo negro, naranja, carrizo y caña de azúcar; así como un daño considerable a las huertas de los rancheros y la pérdida de ganado (González, 2009).

Análisis de mediciones históricas de escurrimientos

Escurrimientos de alta magnitud fueron documentados solo en tres occaciones en la estación Ojo de Agua. La medición del escurrimiento extremo solo fue realizado en septiembre de 1962, en diciembre de 1972 y en septiembre de 1974; de ellas, la de 1972 es la más completa. En la Figura 5 se presenta el hidrograma del escurrimiento observado en la estación Ojo de Agua entre el 25 de diciembre de 1972 y el 4 de enero de 1973 (Figura 5). La precipitación registrada en la estación La Purísima

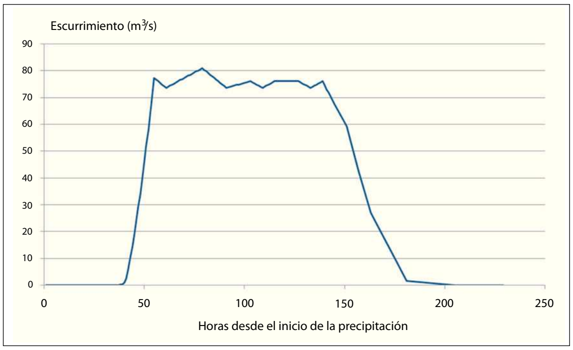


Figura 5. Hidrograma del escurrimiento observado en la estación Ojo de Agua entre el 25 de diciembre de 1972 y el 4 de enero de 1973.

para este evento fue de 69 mm, de lo cual resultó un escurrimiento total de 29 476 millones metros cúbicos, observado en 230 horas.

Análisis de mediciones de la precipitación

De acuerdo con las condiciones climáticas registradas por la estación climatológica de La Purísima operada por la CONAGUA, se observa un aumento en la intensidad de las precipitaciones desde la década de los cuarenta hasta 2010. Para esta estación, el 88% de los datos son estadísticamente considerados como "normales", mientras que un 12% como anómalos.

Como resultado del cálculo de los tiempos de retorno, utilizando la base de datos de precipitaciones diarias de SMN (2012b), se obtuvo una precipitación para el evento de los 1 000 años en la estación La Purísima de 208.24 mm. Cabe mencionar que mediciones recientes muestran para 2009 un evento de 193.9 mm, tan solo 14.4 mm por debajo del evento de 1 000 años (Tabla 1).

Tabla 1. Datos obtenidos de la estación climatológica La Purísima

ESTACIÓN	Clave	X-coor.	Y-coor.	Altura	Precipitación en promedio anual entre 1951 y 2010
La Purísima	3029	416 974	2 882 409	95 msnm	127.3 mm

Análisis del escurrimiento resultante

Para el oasis La Purísima y su afluente principal, el arroyo Cadegomo, se obtuvieron, mediante la modelación hidrológica, los siguiente caudales para tiempos de retorno entre 10 y 1 000 años (Tabla 2). La Figura 6 muestra el hidrograma obtenido para cada uno de estos eventos.

Los resultados del modelo para el área La Purísima se indican gráficamente a continuación.

Los caudales resultantes de los eventos de precipitación extremos generan un incremento importante de los niveles en el drenaje de la cuenca. Las Figuras 6 y 7 muestran los efectos en el arroyo

Tabla 2. Caudales correspondientes a tiempos de retorno entre 10 y 1 000 años

Tiempo de retorno (años)	Precipitación (mm)	Máximo escurrimiento (m^3/s)	Volumen de escurrimiento Mm^3
10	77.2	47.7	26.08
20	99.0	81.7	44.69
50	125.6	129.3	70.74
100	145.1	168.1	91.96
500	189.3	258.9	141.63
1 000	208.2	382.8	209.42

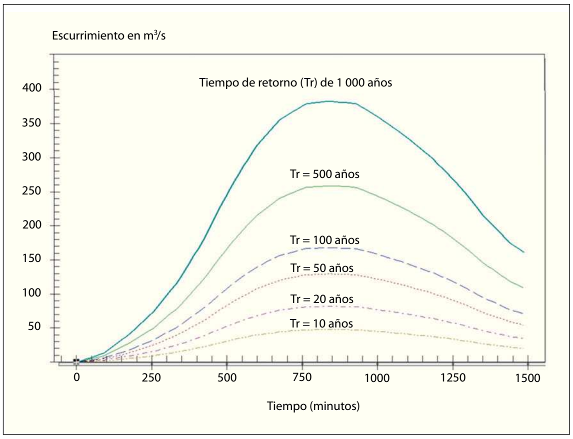


Figura 6. Hidrogramas resultantes de la modelación hidrológica a distintos tiempos de retorno.

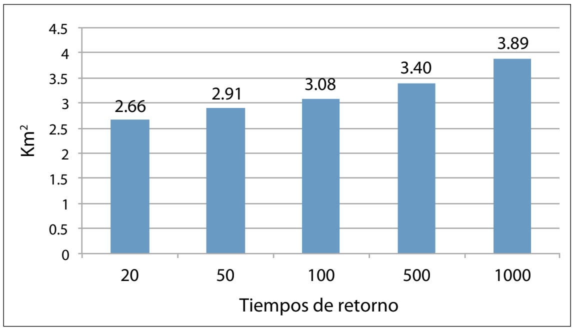


Figura 7. Cambios en las superficies de inundación en el arroyo Cadegomo de acuerdo con la simulación de tormentas para los eventos 20, 50 100 y 1 000 años.

Cadegomo, ante diferentes eventos de precipitación y donde se puede apreciar que la respuesta del arroyo es de un incremento en el área de inundación de hasta 14% respecto al tiempo de retorno de 20 años, 32% a 100 años, 46% a 500 años y 67% a 1 000 años. Un evento de 1 000 años generaría un incremento en el área de inundación de hasta 67% de zona del oasis, afectando región urbana, así como casi todos lotes de cultivo.

CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

Hubo varias ocasiones en la historia con caudales documentados después de eventos de precipitación extremos, que generaron un incremento importante de los niveles en el drenaje de la cuenca. Según la modelación, el río Cadegomo, ante eventos extremos de precipitación, puede sufrir un incremento en el área de inundación de hasta 14% respecto al

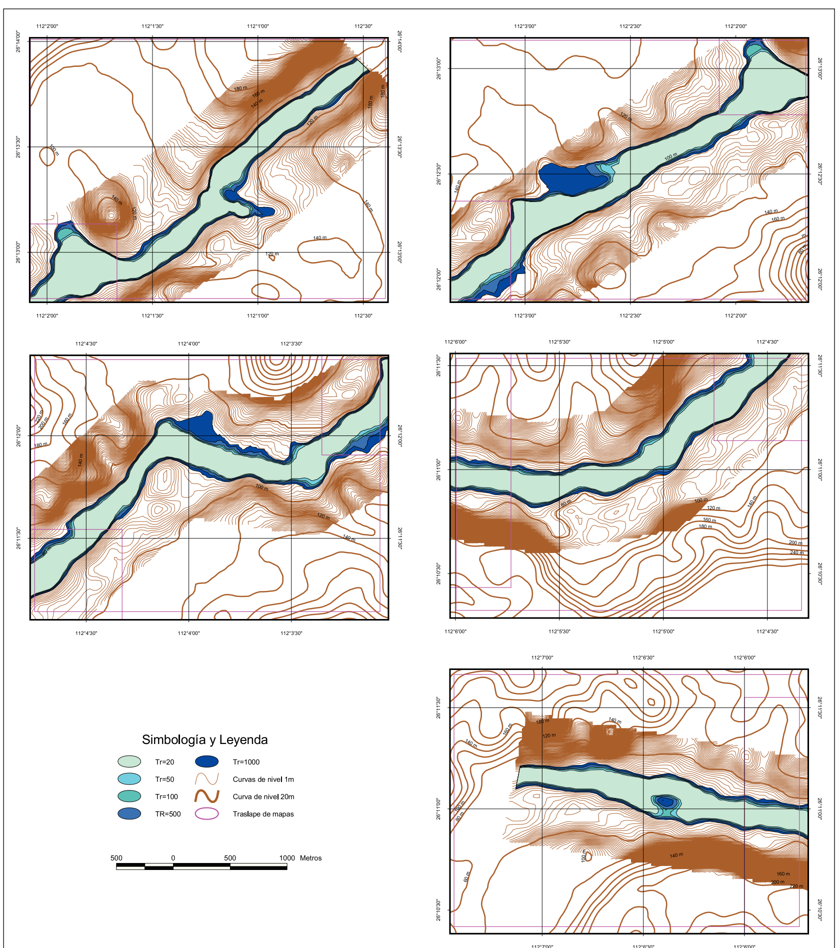


Figura 8. Áreas de inundación para el sitio La Purísima.

tiempo de retorno de 20 años y hasta 67% respecto al tiempo de retorno de 1 000 años. Los resultados son comparables con las pocas mediciones directas de inundaciones extremas del oasis, donde las zonas urbanas así como casi todos lotes de cultivo fueron afectados de manera grave. En Baja California Sur, debido a la falta de mediciones actuales del escurrimiento, es de suma importancia continuar realizando modelos climáticos e hidráulicos, para poder cuantificar los efectos locales que se pudieran esperar ante el fenómeno extremo de escurrimiento, y así poder instalar medidas que permitan limitar las afectaciones económicas y a la sociedad.

REFERENCIAS

Aranda Gómez, J. y J. A. Pérez Venzor (1988), "Estudio geológico de Punta Coyotes, Baja California Sur", *Revista del Instituto de Geología*, núm. 7, UNAM, México, pp. 1-21.

Arredondo, B. (2012), La misión de La Purísima, Baja California Sur [vamonosalbaile.blogspot.mx2012//10/la-mision-de-la-purisima-baja.html; 21 de octubre].

Cariño, M. y A. Ortega (eds.; 2014), *Oasis sudcalifornianos. Para un rescate de la sustentabilidad local*, Universidad de Granada, España.

CNA (2002), *Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Santo Domingo estado de Baja California Sur*, Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica, Comisión Nacional del Agua, México.

CONAGUA (2013), *Base de datos de la CONAGUA, estaciones hidrométricas y su gasto máximo y mínimo histórico*, Comisión Nacional del Agua, México [ftp.conagua.gob.mx/SGTGIA/Cartograf%EDa/13_may_08/control%20de%20estaciones%20hidrom%E9tricas.xls, visitado el 7/04/2013].

García, E. y CONABIO (1998a), "Mapa de climas; clasificación de Köppen, modificado por García", escala 1:1 000 000, México.

González Vizcarra, E. (2009), "Afectó "Jimena" los oasis de San Isidro y La Purísima, en BCS La Paz", 20 de eptiembre [http://issuu.com/unomasuno/docs/20sep09].

Hausback, B. P. (1984), "Cenozoic volcanic and tectonic evolution of Baja California Sur, Mexico", in Frizzell, V. A. Jr. (ed.), *Geology of the Baja California Peninsula*, Pacific Section S.E.P.M., no. 39, pp. 219-236.

Heim, A. (1922), "Notes on the Tertiary of southern Lower California", *Geol. Mag.,* no. 59, pp. 529-547.

INEGI (1996), *Estudio geohidrológico del estado de Baja California Sur*, Instituto Nacional de Estadística y Geografía del estado de Baja California Sur, México.

INEGI (2010), *Censo de Población y Vivienda 2010*, Instituto Nacional de Estadística, Geografia e Informática, México.

INEGI (2013), "Datos para Sistemas de Información Geográfica de sistemas hidrológicos", *Simulador de flujos de agua en cuencas hidrográficas (SIATL) ver. 2.1*. [http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/SIATL/#, Acceso 01/09/2013]

Jiménez Espinosa, M. (1997), "Manual de operación del programa Ax", Centro Nacional de Protección de Desastres, en Aya, Y., R. Coria y R. Domínguez, *Caracterización de los oasis. Los oasis de la península de Baja California*, Centro de Investigaciones Biológicas, La Paz, pp. 5-25.

Jiménez Rugerio, M. del R. (2011), *Modelación de la dinámica hidrológica y erosiva en barrancos de la cuenca del Río Nazas–Rodeo mediante un SIG*, tesis de Doctorado, Instituto Politécnico Nacional, México [http://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitsam/123456789/12711/Tesis%20Jimenez%20 Rugerio.pdf?sequence=1; 5 de mayo 2014].

Martz, L. W (2002), "SLURP-TOPAZ Overview and Applications*", Background Material for MAGS Model Training Workshop*, 4-5 September, York University, Toronto, Canada.

Maya, Y., R. Coria y R. Domínguez (1997), "Carcaterización de los oasis", en Arriaga, L. y R. Rodríguez Estrella (eds.), *Los oasis de la Península de Baja California*, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, SIMAC, La Paz, pp. 5-25.

Meehl, G. A., T. F. Stocker, W. D. Collins, P. Friedlingstein, A. T. Gaye, J. M. Gregory, A. Kitoh, R. Knutti, J. M. Murphy, A. Noda, S. C. B. Raper, I. G. Watterson, A. J. Weaver and Z.-C. Zhao (2007), "Global climate projections", in Solomon S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller H L (eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Ramírez, M., G. Lucía, O. Oropeza Orozco, J. Lugo Hubp, M. Cortez Vázquez and E. Jáuregui Ostos (2007), "Análisis de las principales causas de las inundaciones de septiembre de 2003 en el sur del estado de Guanajuato, México", *Investigaciones Geográficas*, Boletín, núm. 64, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 7-25.

RAMSAR (2014), "The List of Wetlands of International Importance" [http://www.ramsar.org/pdf/sitelist.pdf].0

Routson, R. (2012), *Conservation of agro-biodiversity in Baja California Oases*, A Dissertation Submitted to the Faculty of the School of Geography and Development, Degree of Doctor of Philosophy, The University of Arizona, Arizona, USA.

Ruiz Campos, G., F. Camarena Rosales, S. Contreras Balderas, G. Bernardi y J. De La Cruz Agüero (2008), "Evaluación ecológica y distribución de peces exóticos en las regiones hidrológicas de San Ignacio y La Purísima, Baja California Sur, y su impacto en las poblaciones del pez amenazado Fundulus lima" [http://promepca.sep.gob.mx/archivospdf/produccion/Producto1212033.PDF].

Sawlan, M. G. and J. G. Smith (1984), "Petrologic characteristics, age and tectonic setting og Neogene volcanic rocks in northern Baja California Sur, Mexico", in Frizzel, V. A. Jr. (ed.), *Geology of Baja California Peninsula*, Society for Sedimentary Geology (SEPM), Pacific Section, publication 39 pp. 237-252.

SCT (2000), "Isoyetas de intensidad de lluvia para el estado de Baja California Sur" (periodos de retorno de 10, 20, 25, 50 y 100 años, cada uno con duraciones de 5, 10, 20, 30, 60, 120 y 240 minutos), Secretaría de Comunicaciones y Transportes [http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Isoyetas/baja_california_sur.pdf].

Secretaría de Promoción y Desarrollo Económico (2014), "Proyecto Estratégico de Desarrollo Sustentable Oasis Sudcalifornianos" [www.spyde.bcs.gob.mx/cgds/files/proyectos/OasisSudcalifornianos_V3_2012.pdf].

SGM (2010), "Carta Geológico-Minera 1:250 000, Clave G12-7-8 Villa Constitución", Servicio Geológico Mexicano.

SMN (2012a), "Estadística descriptiva de la estación climatológica 3029 La Purísima", Servicio Meteorológico Nacional [http://smn.cna.gob.mx/climatologia/Estadistica/3029.pdf, acceso 05/08/2013].

SMN (2012b), "Base de datos de precipitaciones, evaporación y temperaturas diarias de la estación climatológica 3029 La Purísima", Servicio Meteorológico Nacional [http://smn.cna.gob.mx/climatologia/Diarios/3029.txt, acceso 05/08/2013].

SMN (2013), "Normales climatológicas de la estación climatológica 3029 La Purísima", Servicio Meteorológico Nacional [http://smn.cna.gob.mx/climatologia/Normales5110/NORMAL03029.TXT, acceso 0/08/2013].

Suárez Buenrostro, N. (2013), *Caracterización de eventos extremos de precipitación, empleando distribuciones mezcladas*, tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Querétaro, México [http://ri.uaq.mx/bitstream/123456789/482/1/R1000124.pdf; 5 de mayo 2014].

Trejo Barajas, D. (2002), *Informes económicos y sociales sobre Baja California 1824-1857*, Universidad Autónoma de Baja California Sur, La Paz, BCS, México.

USACE (2010), *User´s manual for HEC-RAS Versión 4.1. Hydrologic Engineering Center,* U.S. Army Corps of Engineers [http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS_4.1_Users_Manual.pdf; acceso 10/07/2013].

Urbano Lassépas, U. (1859), *Historia de la Colonización de la Baja California*, Decreto de 10 de marzo de 1857, Imprenta de Vicente García Torres, México.

Valadés, A. (1974), *Historia de la Baja California 1850-1880*, UNAM, México.